

УДК 536.26

© 1994 г. БРАТУТА Э. Г., ЯРОШЕНКО Т. И., МУРАВЬЕВ В. И.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В КОНДЕНСАТОРАХ СМЕШИВАЮЩЕГО ТИПА

Разработана математическая модель процессов теплообмена и гидродинамики в конденсаторах смешивающего типа. Проведены численные эксперименты, использующие функцию распределения полидисперсного ансамбля капель по размерам для натурального конденсатора.

В соответствии с известными прототипами конструкций конденсаторов смешивающего типа (КСТ) (см. рис. 1) процесс конденсации пара осуществляется в следующих основных формах реализации тепло- и массообмена с охлаждающей водой:

конденсация на поверхности полидисперсного ансамбля капель, продуцируемого системой форсунок;

конденсация на поверхности пленки воды, стекающей по плоским элементам конструкции (щитам), разделяющим отсеки конденсатора;

конденсация пара на наружной поверхности коллектора.

Исследование описанных трех процессов тепло- и массообмена в КСТ проводилось с помощью математической модели, состоящей из следующих уравнений.

Уравнение движения одиночной капли i -го разряда в движущейся парогазовой среде

$$m_i dW_{ui}/dt = m_i g - c_d \psi(D) \rho_a f_{ui} |U|U/2, \quad (1)$$

где $U = W_c - W_k$ — относительная скорость капли, W_c и W_k — абсолютные скорости парогазовой смеси и капли; m_i — масса капли i -го разряда; $c_d = 24/Re + 4,4/(Re)^{0,5} + 0,32$ — коэффициент ее аэродинамического сопротивления; $\psi(D) = \exp(0,03We^{1,5})$ — функция деформации капли; ρ_a — плотность воздуха; f_{ui} — площадь миделева сечения капли; g — ускорение свободного падения. Индекс i означает номер интервала разбиения непрерывной функции распределения объемов капель по диаметрам, описываемой выражением вида [1]

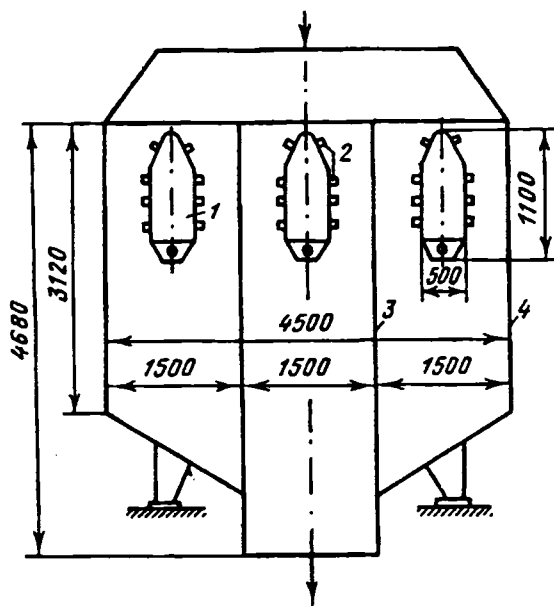
$$V(D_i) = \frac{2}{3\pi} \bar{\alpha}^4 D_i^3 \mathcal{K}_1(\bar{\alpha} D_i), \quad (2)$$

где $\bar{\alpha}$ — параметр, определяемый в эксперименте; D_i — диаметр капли; V — ее объем; \mathcal{K} — функция Бесселя второго рода мнимого аргумента первого порядка.

Уравнение теплового баланса между паром, каплями, пленкой жидкости, гравитационно стекающей по вертикальным поверхностям, и стенкой коллектора

$$Q_j = M_{n0} (i_{x(j-1)} - i_{xj}) = Q_{kj} + Q_{плj} + Q_{колj}, \quad (3)$$

где M_{n0} — расход пара, поступающего в КСТ; $(i_{x(j-1)} - i_{xj})$ — изменение энтальпии пара в процессе конденсации на j -м участке КСТ. Индекс j указывает номер интервала разбиения пространства аппарата на горизонтальные слои, в



Слив конденсата

Рис. 1. Схема исследуемого КСТ. 1 — коллектор; 2 — форсунки; 3 — разделительный щит; 4 — наружная стенка КСТ

пределах которых удобно решать систему уравнений. При $j = 0$ рассматривается слой на входе в аппарат.

Количество тепла, воспринятое каплями за время полета от устья форсунки до щита:

$$Q_{kj} = \sum_{\eta} \sum_i m_{\rho k} \frac{\Delta t_{\eta}}{\Delta \tau},$$

где η — номер интервала интегрирования по времени уравнения (1) при решении его численными методами.

Количество тепла, воспринятое пленкой жидкости, стекающей по вертикальной стенке аппарата на j -м участке КСТ:

$$Q_{плj} = M_{плj} f_{рж} (t_j - t_{\rho}) = \alpha f_{плj} (t_n - \bar{t}_{плj}), \quad (4)$$

где $M_{плj}$ — масса жидкости, стекающей по щиту j -го участка и имеющей площадь поверхности $f_{плj}$ и среднюю температуру $\bar{t}_{плj} = (t_{0j} + t_j)/2$. Из уравнения (4) находится температура пленки жидкости t_{ρ} .

В качестве начальной температуры пленки на некотором j -м участке берется величина

$$t_{\rho} = \frac{M_k \bar{t}_{kj} + M_{пл(j-1)} t_{пл(j-1)} + M_{скj} t_n}{M_{kj} + M_{пл(j-1)} + M_{скj}},$$

где M_{kj} — расход капель, осевших на щите j -го участка; $M_{плj} = M_{пл(j-1)} + M_{kj} + M_{скj}$ — расход жидкости, стекающей в виде пленки на j -м участке. Осредненная температура капель, оседающих на j -м участке, может быть вычислена по формуле

$$\bar{t}_{kj} = \sum_i \bar{t}_{ki} \int_{D_i - \Delta D/2}^{D_i + \Delta D/2} v(D) dD / \sum_i \int_{D_i - \Delta D/2}^{D_i + \Delta D/2} v(D) dD.$$

Как показали наши предварительные расчеты, для всего диапазона параметров теплообмена и разрядов капель среднее значение критерия Bi составляет порядка 0,8...1,5. Кроме того, так как коэффициент деформации капли для рассматриваемого процесса изменяется в пределах от 1,005 до 1,05, то для вычисления средней температуры капель i -го разряда в момент времени прихода на поверхность щита или жидкой пленки используется уравнение теплопроводности для шара при граничных условиях первого рода. Средняя по объему температура капли определяется выражением [2]

$$\bar{\theta}_w = \frac{\bar{T}_x(\tau) - T_c}{T_{0x} - T_c} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n'' \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

где $B_n'' = 6/\mu_n^2$; $\mu_n = n\pi$; $T_c = 273 + t_n$ — абсолютная температура парогазовой среды; T_{0x} — начальная и $\bar{T}_x(\tau) = 273 + \bar{t}_x$ конечная абсолютные температуры капель i -го разряда; $Fo = \alpha\tau/(D_w/2)^2$.

Коэффициент теплоотдачи α_j в уравнении (4) рассчитывается с помощью эмпирических соотношений [3]:

$$\alpha_j = Nu \lambda_x / d_{экj},$$

$$Nu = 2,7 Re_x^{0,6} Pr_x^{0,45} K^{0,11} We_n^{0,4} (d_{экj}/l),$$

где λ_x — теплопроводность жидкости; $d_{экj}$ — эквивалентный диаметр плоской пленки жидкости на j -м участке; $Re_x = W_x d_{экj} / \nu_x$ — число Рейнольдса для жидкости; $We_n = \rho_w (W_n - W_x) d_{экj} / \sigma_x$ — число Вебера для пара; $K = r/(c_{рж} \Delta T)$ — число фазового превращения; l — длина пленки жидкости; $W_x = W_{n,j}$ — средняя скорость стекания жидкости на j -м участке вертикального щита. Ее можно определить из выражения вида [4]:

$$\bar{W}_{n,j} = \Gamma_j / (\rho_x \delta_j),$$

где $\Gamma_j = M_{n,j}/\Pi_j$ — плотность орошения; Π_j — полный смоченный параметр; δ_j — средняя толщина пленки, которая определяется режимом течения жидкости. Влияние содержания в исходном паре неконденсирующихся газов (в том числе и воздуха) на коэффициент теплоотдачи α можно учесть по экспериментальной зависимости [3]:

$$\alpha_{см}/\alpha_0 = 0,168 (\varepsilon k)^{-0,1} (l/d_{эк})^{0,33},$$

где α_0 и $\alpha_{см}$ — коэффициенты теплоотдачи чистого пара и пара из паровоздушной смеси соответственно; $k = M_x/M_{n0}$ — кратность конденсации; $\varepsilon = M_r/M_{n0}$ — концентрация воздуха в паре на входе в конденсатор.

Количество тепла, воспринятое наружной стенкой коллектора при конденсации на ней пара:

$$Q_{колj} = f_j \alpha_{кол} (t_n - t_{кол}),$$

где f_j — площадь стенки коллектора на j -м участке; $t_{кол}$ — температура стенки коллектора, которую можно принять равной температуре воды в коллекторе t_w . Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{кол}$ при конденсации пара на плоской вертикальной поверхности коллектора определяется формулой [5]

$$\alpha_{кол} = \left(\frac{\gamma^2 r \lambda^3}{4 \mu x (t_n - t_{кол})} \right)^{1/4},$$

где γ , λ , μ — удельный вес, теплопроводность и вязкость конденсата; r — теплота испарения; x — расстояние от начала течения пленки конденсата. Для наклонной стенки:

$$\alpha_{\psi кол} = \alpha_{кол} (\sin \psi)^{1/4},$$

где ψ — угол наклона стенки к горизонту.

Найденное из уравнения (3) значение энтальпии пара i_x , на некотором j -м участке КСТ позволяет определить степень сухости \mathcal{X} пара на этом участке по формуле:

$$\mathcal{X}_j = (i_x - i')/r,$$

где i' — энтальпия кипящей воды. На начальном участке (при входе пара в конденсатор) $j=0$; $i_x = x_0 i''$, где i'' — энтальпия сухого насыщенного пара; а \mathcal{X}_0 — степень сухости пара.

Далее можно вычислить удельный объем v_x пара и его скорость W_{nj} на каждом j -м участке КСТ:

$$v_x = v' \mathcal{X}_j,$$

$$W_{nj} = v_{x(j-1)} (M_n - M_{cx(j-1)}) / F_{(j-1)},$$

где v' — удельный объем сухого насыщенного пара; F_j — площадь j -го поперечного сечения пространства КСТ.

При $j=0$

$$W_{n0} = v' \mathcal{X}_0 M_{n0} / F_0.$$

Количество сконденсировавшегося в j -м слое пара определяется выражением:

$$M_{cxj} = M_{n0} (1 - \mathcal{X}_j).$$

Поскольку на начальном этапе вычислений M_{cx} неизвестно, необходимо применять итерационную процедуру вычислений. При $it=1$ $M_{cx}=0$, далее при $it > 1$ $M_{cxj} = \mathcal{F}(\mathcal{X}_j)$ по формуле (5).

Учет изменения концентрации воздуха в процессе конденсации в КСТ и влияние ее на парциальное давление пара осуществляется по формуле

$$P_{nj} = P_n / \left(1 + \frac{R_a}{R_n} \varepsilon_j \right),$$

где P_n — давление насыщенного пара на входе в конденсатор; R_a и R_n — газовые постоянные воздуха и пара.

Разработанная математическая модель позволяет определить количество сконденсировавшегося пара и степень сухости оставшегося пара в любом j -м слое по высоте H активного пространства КСТ.

Проверка адекватности математической модели осуществлялась на примере смешивающего конденсатора фирмы EGI (Венгрия), работающего с турбиной К-200-130 НПО ЛМЗ. Схема конденсатора приведена на рис. 1. Режимные параметры конденсатора: расход пара 62,4 кг/с; расход охлаждающей воды 3120 кг/с; давление в конденсаторе 0,05 бар; давление охлаждающей воды перед форсунками 0,15 МПа; кратность конденсации 50.

Величина параметра распределения $\bar{\alpha}$ в уравнении (2) принималась на основе экспериментального исследования дисперсного состава капель, продуцированных форсункой рассматриваемого конденсатора при давлении охлаждающей воды 0,15 МПа.

Число горизонтальных слоев, на которые разбивалось пространство КСТ, не превышало $j_{\max} = 10$. Итерационная процедура, описанная выше, применялась внутри каждого слоя при $1 \leq j \leq j_{\max}$. Решение задачи, получаемое при численной реализации предложенной математической модели, является устойчивым для различных параметров процесса — температуры конденсата, стекающего по вертикальным щитам, степени сухости и энтальпии конденсирующегося пара, количества несконденсированного пара и т. д. Иллюстрацией может служить зависимость разности в значениях температуры конденсата t_n от числа итераций

Рис. 2. Сходимость итерационного процесса математической модели

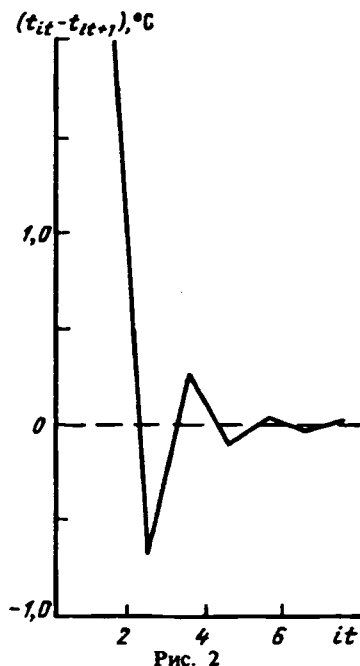
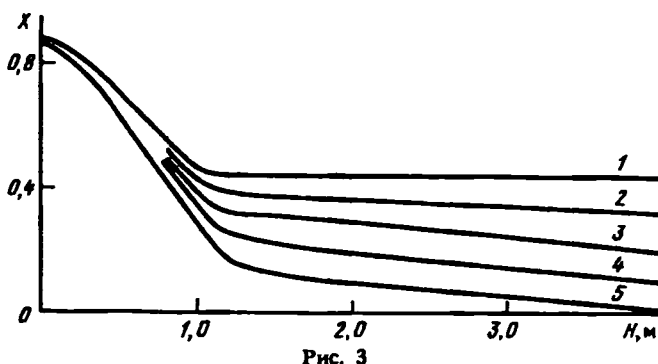


Рис. 3. Зависимость степени сухости пара от высоты КСТ: $t_a = 23^\circ \text{C}$; $P_n = 0,05$ бар; 1 — $k = 30$; 2 — 35; 3 — 40; 4 — 45; 5 — 50



it , представленная на рис. 2. При $it > 7$ $\Delta t_n \rightarrow 0$ для любого j . Изменение степени сухости конденсирующегося пара по высоте H аппарата приведено на рис. 3. При заданной кратности конденсации ($k = 50$) весь пар конденсируется на высоте $H = 4$ м (кривая 2), т. е. в активном пространстве КСТ процесс конденсации полностью завершается.

Таким образом, предложенная математическая модель достоверно моделирует процессы тепло- и массообмена, происходящие в реальных промышленных КСТ. Это дает возможность исследовать влияние основных параметров и величин, определяющих работу конденсатора, на процесс конденсации и на основе полученных результатов выработать рекомендации для проектирования конденсаторов данного типа.

К сожалению, объем статьи не позволяет изложить все результаты численных экспериментов, проведенных авторами. Приведем лишь один пример. На рис. 3 показано, что при кратностях конденсации меньше 50 (реализованной в натурном конденсаторе) процесс конденсации остается незавершенным.

Многочисленные расчеты показали, что $Q_{\text{мн}}$ не превышает 0,01% общего количества тепла, выделяемого паром в КСТ. Поэтому для упрощения алгоритма

вычислений расчетом количества тепла, выделяемого паром при конденсации на наружной стенке коллектора, можно пренебречь.

Оценка потерь тепла через наружные стенки конденсатора показала, что Q потерь составляет $0,005+0,08\%$ от $(Q_k + Q_m)$, что также является несущественным.

Выводы. Предложенная математическая модель позволяет определить изменение концентрации пара и воздуха по высоте секции КСТ, установить требуемый расход циркуляционной воды, исключаящий переохлаждение конденсата и обеспечивающий требуемый вакуум в КСТ.

Это дает возможность разрабатывать конкретные рекомендации при проектировании конденсаторов смешивающего типа, а также выполнять оптимизационные расчеты при выборе наивыгоднейшего противодавления пара с целью минимизации расхода энергии на собственные нужды энергоблока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братута Э. Г. Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях. Харьков: Высш. шк., 1987. 144 с.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Энергия, 1967. 600 с.
3. Шкловер Г. Г., Родивилин М. Г. Тепло- и массообмен при конденсации пара на струях воды// Теплоэнергетика. 1975. № 11. С. 65—68.
4. Тананайко Ю. М., Воронцов Е. Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. Киев: Наукова думка, 1975. 312 с.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.; Л.: Изд. ГЭИ, 1956. 392 с.

Харьков

Поступила в редакцию
10.IX.1992